第42卷 第2期
2025年2月

干 旱 区 研 究
ARID ZONE RESEARCH

Vol. 42 No. 2
Feb. 2025

塔里木盆地农业光热资源特征及开发潜力分析

文 迪[1]， 吕爱锋[2]， 李涛辉[3]， 张文翔[1]

（1. 云南师范大学地理学部，云南省高原地理过程与环境变化重点实验室，云南 昆明 650500；
2. 中国科学院地理科学与资源研究所，陆地水循环及地表过程重点实验室，北京 100101；
3. 云南大学，云南省大湄公河次区域气象灾害与气候资源重点实验室，云南 昆明 650091）

摘 要： 农业光热资源是塔里木盆地西部大开发国家战略中核心的优势资源。然而，目前鲜见对塔里木盆地农业光热资源开发潜力进行综合定量评估。在对塔里木盆地农业光热资源时空演变特征分析的基础上，构建了综合的评价指标体系，采用熵权-TOPSIS法和Mann-Kendall检验等方法对塔里木盆地农业光热资源的开发潜力进行量化评估。结果表明：（1）1990—2020年塔里木盆地的农业光热资源中年日照时数、年太阳辐射总量、≥10 ℃活动积温和年平均气温都呈现上升趋势，而≥3 h有效日照天数和年蒸发量则呈现下降趋势。（2）塔里木盆地的农业光热资源存在显著的空间不均衡性，不同指标呈现不同的空间分异特征，形成了显著的高农业光热资源和低农业光热资源聚集分布的空间特征。（3）塔里木盆地农业光热资源开发潜力存在显著空间差异，开发潜力评分均值为0.199，最高的策勒县（0.578）是最低的柯坪县（0.094）的6倍多，形成“多核心”的分布态势。研究结果可为塔里木盆地的农业光热资源开发利用提供参考，助力提升当地资源利用率。

关键词： 塔里木盆地；农业光热资源；时空格局；开发潜力；熵权-TOPSIS法

农业生产的条件包括自然和社会经济条件等诸多方面，其中光、热等资源是影响农业生产极为重要的自然条件[1-3]。农业光热资源是指一个地区可为农业生产提供的光能资源和热能资源的统称，光、热要素的数量、组合和分配状况在一定程度上对一个地区的农业生产和社会经济发展起着关键性作用[3-5]。2020年5月，中共中央、国务院发布《关于新时代推进西部大开发形成新格局的指导意见》，指出作为中国西北内陆光热资源丰富区，我们需要依托其优势，推动现代化产业体系构建，促进农村产业融合与升级，加强高标准农田及设施农业建设，并发展大数据、人工智能等新兴产业，同时提升服务业水平，打造旅游休闲等支柱产业，为区域经济发展注入新活力[6-7]。立足于县级区域光热资源禀赋，并结合农业资源现状和农业生态环境对西北地区的农业光热资源开发潜力进行综合定量评估具有重要意义，可为光热资源有效利用提供理论和现实依据，并推动区域农业和社会经济的高质量发展[8]。塔里木盆地作为中国西北内陆的重要组成部分，塔里木盆地不仅是丝绸之路经济带的关键区域，也是“西部大开发”国家战略的重点实施区域，其丰富的光热资源和特色农业发展具有重大潜力和优势。

近年来，光热资源的开发利用逐渐受到社会各界的广泛关注和重视[9-11]，已有大量研究，内容涉及光热资源与农作物生长的相互关系、光热资源的变化特征、光热资源的利用效率评估等方面，如宁夏中宁枸杞生长季光热资源变化对发育期的影响[12]，并发现光热资源随时间变化会出现增加或减少现象，体现时间分配上的不稳定性[13]。一些学者还关注了光热资源的利用效率[14-18]，包括不同播期、耕作方式、灌水施肥方式及栽培模式对作物光热资源利用效率的影响。综合来看，以往研究加深了对农业光热资源重要性和利用情况的认识，但仍存在一些不足。首先，现有研究主要关注农业光热资源在时间上的演变趋势，但忽略了农业光热资源在空间分

收稿日期： 2024-10-14； **修订日期：** 2024-12-09
基金项目： 第三次新疆综合科学考察专项“塔里木河流域光热水资源现状与演变调查”（2021xjkk0203）
作者简介： 文迪（1999-），女，硕士研究生，研究方向为气候变化及农业生态环境. E-mail: 1159673486@qq.com
通讯作者： 张文翔. E-mail: wenxiangzhang@ynnu.edu.cn

布上通常具有不均衡性[1,19–21],对其在空间格局和演变特征的研究相对不足。其次,大量研究着重评价了不同情景下对农业光热资源的利用效率,但对区域农业光热资源的开发潜力研究不够深入,目前仍然缺乏一个综合的农业光热资源开发潜力的评估框架。最后,不同区域的农业光热资源条件存在一定的差异性,开展空间格局和开发潜力评估研究对指导区域光热资源开发利用与农业发展具有实用性和针对性[22–23]。此外,目前的研究尺度主要以市域[24]以及省域[25]等自然单元为主,很少以较小尺度的自然单元为对象对农业光热资源展开相关研究,尤其是对光热资源极为丰富的中国西北内陆地区的关注仍然不足。

塔里木盆地位于中国西北内陆,是丝绸之路经济带的重要组成部分,也是重要的经济区域和巩固脱贫攻坚成果的重点地区。中国政府极为重视塔里木盆地的经济发展与社会稳定,在"西部大开发"国家战略中塔里木盆地是重点实施区域。然而,塔里木盆地气候干燥,水资源匮乏,大部分为荒漠戈壁,生态环境脆弱,农业生产条件相对较差[26]。但塔里木盆地日照时间长,光热资源丰富,昼夜温差大,适宜发展特色农产品种植,在充分开发利用光热资源的前提下,塔里木盆地的农业发展具有相当大的潜力和优势[26–28]。随着社会经济发展、现代化农业发展和可持续协调发展的需求逐渐强烈,对塔里木盆地地区提出了新的问题:第一、塔里木盆地的农业光热资源随时间推进其在空间尺度上是如何变化的?第二、塔里木盆地不同地区的农业光热资源开发潜力有何差异,其中哪些地区开发潜力大?探讨并回答上述问题有助于指导塔里木盆地光热资源的充分合理开发,提升利用效率,提高农业生产力,促进区域社会经济发展和居民生活质量。

综上所述,本研究以县域为自然单元,在分析塔里木盆地42个县区农业光热资源的时空格局特征的基础上,通过结合光热资源禀赋、农业资源现状和农业生态环境三个维度构建了综合的评价指标体系,并采用熵权-TOPSIS法评估了塔里木盆地农业光热资源的开发潜力,并提出针对性的开发利用建议。研究结果将有助于了解塔里木地区农业光热资源的优势与不足,为该地区农业高质量发展提供有益参考。

1 资料与方法

1.1 研究区概况

塔里木盆地位于中国新疆南部,主要由喀什、和田、阿克苏地区、巴音郭楞蒙古自治州和克孜勒苏柯尔克孜自治州组成(图1)。塔里木盆地地貌呈环状分布,边缘处主要是与山地连接的砾石戈壁,中心区域主要是辽阔沙漠,中国最大的沙漠塔克拉玛干沙漠位于盆地中心,边缘和沙漠间则是冲积扇和冲积平原,并分布有绿洲。塔里木盆地属于温带大陆性气候,年均温9~11 ℃,无霜期超过200 d,因深居内陆,气候极为干燥,降水极其稀少,因此,干旱是其最主要特点。另外,该盆地光照强,北部年日照时数超过3000 h,南部也接近3000 h,太阳年总辐射量达575~627 kJ·cm^{-2},光热资源极为丰富[26–28]。

1.2 数据来源

本研究资料包括1990—2020年塔里木盆地42个县的气候、水资源、农业、社会经济等数据。其中,年日照时数、年太阳辐射总量、≥3 h有效日照天数、≥10 ℃活动积温、年平均气温和年蒸发量数据来源于本项目组所研究得出的1990—2020年塔里木盆地光热资源数据集,空间分辨率为1 km。水资源储量、农业水资源利用量、有效灌溉面积、农用地面积比重和农业基础设施投入成本数据来源于1990—2020年新疆水资源公报、1990—2020年新疆统计年鉴以及科考项目组的数据收集统计等。水土流失率、人均GDP、农业总产值、旱涝发生频率和退化耕地比重数据来源于1990—2020年新疆统计年鉴、高精度遥感气候数据集以及科考项目组的数据收集统计等。

1.3 Mann-Kendall趋势检验

Mann-Kendall(MK)突变检验是一种非参数检验方法,可用来检验基于时间序列数据的增加和减少趋势,其优点是不用对数据系列进行特定的分布检验,也不受少数异常值的干扰,更适用于类型变量和顺序变量。计算公式如下:

$$S_k=\sum_{i=1}^{k}\sum_{i=1}^{i-1}a_{ij},\ \ k=2,3,\cdots,n \tag{1}$$

其中:

$$a_{ij}=\begin{cases}1,x_i>x_j\\0,x_i\leqslant x_j\end{cases},\ \ j=1,2,3,\cdots,i \tag{2}$$

式中:秩序列S_k为i时刻数值大于j时刻数值个数的

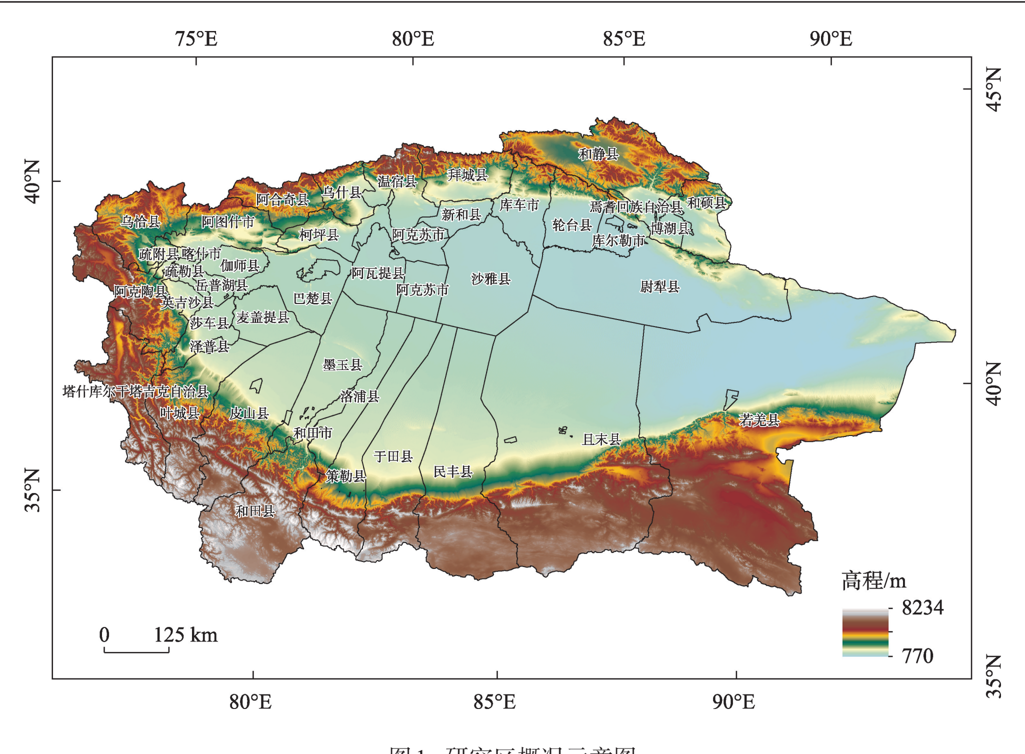


图1 研究区概况示意图

Fig. 1 Overview of the study area

和,可知k=1时,S_1=0。在时间序列随机独立的假定下,定义统计变量:

$$UF_k = \frac{S_k - \mathrm{E}(S_k)}{\sqrt{\mathrm{Var}(S_k)}}, \quad k = 2,3,\cdots,n \tag{3}$$

式中:UF_k为定义的统计量,UF_1=0;$\mathrm{E}(S_k)$、$\mathrm{Var}(S_k)$为累计数S_k的均值和方差,在$X_1, X_2, \cdots, X_n$相互独立且有相同连续分布时,可通过以下公式进行计算:

$$\begin{cases} \mathrm{E}(S_k) = \dfrac{n(n+1)}{4} \\ \mathrm{Var}(S_k) = \dfrac{n(n-1)(2n+5)}{72} \end{cases} \tag{4}$$

UF通过时间序列$X_1, X_2, \cdots, X_n$的顺序计算其统计量,UB通过时间序列X的逆序计算。给定显著水平α=0.05,临界值为±1.96。若$|UF|$>1.96,则表明序列存在显著的变化趋势。若UF>0,表明序列呈现上升趋势,若UF<0表明呈下降趋势,若UF=0表明无变化趋势。若UF>1.96,则序列有显著上升趋势;UF<−1.96,则序列有显著下降趋势。若UF与UB在临界值之间出现交点则交点对应的时刻为突变开始时间。

1.4 开发潜力综合评价的方法

熵权-TOPSIS法是熵权法与TOPSIS法相结合的综合评价方法,通过确定评价对象与最优解、最劣解之间的距离来进行排序,若评价对象距离最优解最近且离最劣解最远,则将其确定为最优决策方案[29-32]。本研究在构建农业光热资源开发潜力评价指标体系的基础上,通过熵权法确定不同指标的权重,采用TOPSIS模型对塔里木盆地42个县区的农业光热资源开发潜力进行综合评价。

1.4.1 指标体系构建 为科学评价塔里木盆地的农业光热资源,在梳理农业光热资源发展潜力的相关文献[33],并基于对塔里木盆地农业光热资源的理解,结合塔里木盆地农业开发和资源储量的实际情况,遵循科学性、系统性和数据可获取性等原则,从光热资源禀赋、农业资源现状和农业生态环境三大维度出发,构建了塔里木盆地农业光热资源开发潜力评价指标体系(表1)。

光热资源是农业生产活动中重要的气候资源,包括光能资源和热能资源。因此,在评价光热资源禀赋维度方面,本研究选择了年日照时数、年太阳辐射总量、≥3 h有效日照天数、≥10 ℃活动积温、年平均气温和年蒸发量6个因素作为光能资源和热能资源的评价指标。此外,除了资源禀赋、农业资源条件外,农业生态环境状况也是决定光热资源能否有效得到开发和利用的重要影响因素,因此,也是综合评价塔里木盆地农业资源发展现状与潜在开发能力的重要维度。农业资源是从事农业生产或

表1　塔里木盆地农业光热资源开发潜力评价指标体系及数据来源

Tab. 1　Evaluation index system and data source of agricultural solar and thermal resources development potential in Tarim Basin

准则层	指标层	指标定义	单位	数据来源	指标
光热资源禀赋	年日照时数	一年内日照时间的累计值	h	新疆第三次科学考察	A1
	年太阳辐射总量	一年内太阳辐射的累计值	$MJ\cdot m^{-2}$		A2
	≥3 h有效日照天数	一年内日照时长≥3 h的天数	d		A3
	≥10 ℃活动积温	一年中日平均温稳定维持在≥10 ℃的日平均温度的总和	℃		A4
	年平均气温	全年各日平均气温的算术平均值	℃		A5
	年蒸发量	一年内区域表面的潜在(水面)蒸发量	mm		A6
农业资源现状	水资源量	区域内地表和地下水资源总量	$10^8 m^3$	新疆统计年鉴	A7
	农业水资源利用量	农业生产活动中利用的水资源量	$10^8 m^3$		A8
	有效灌溉面积	能够得到有效灌溉的农田面积	$10^3 hm^2$		A9
	农用地面积比重	区域内农用地占总面积的比重	%		A10
	农业基础设施投入	区域内农业基础设施的投入成本	10^4元		A11
农业生态环境	土壤侵蚀模数	单位面积土地受到侵蚀的程度		遥感气候数据集	A12
	人均GDP	区域内人均生产总值	元	新疆统计年鉴	A13
	农业总产值	区域内农业生产总值	10^4元		A14
	旱涝发生频率	区域内旱涝事件的发生比例	%		A15/A16
	退化耕地比重	耕地退化面积占耕地面积的比重	%		A17

农业经济活动所利用或可利用资源的总称,其包括农业自然资源和农业经济资源。评价塔里木盆地农业资源发展现状,能为塔里木盆地农业光热资源开发提供强有力的内部支撑。本研究选择了水资源储量、农业水资源利用量、有效灌溉面积、农用地面积比重和农业基础设施投入成本5个指标。农业生态环境是指直接或者间接影响农业生存和发展的土地资源、水资源、气候资源和生物资源等各种要素的总称,是农业生存和发展的前提,是人类社会生产发展最重要的物质基础。选取水土流失率、人均GDP、农业总产值、旱涝发生频率[34-35]和退化耕地比重5个指标作为塔里木盆地农业生态环境的评估因素。

为定量分析塔里木盆地42个县级行政区的农业光热资源开发潜力,采用国家县级行政区作为标准分区,将1990—2020年的数据处理成42个县级行政区的多年平均值,以确保时间尺度和空间尺度的一致性。其中,光热资源禀赋数据采用本课题生产的栅格数据集,将42个县级行政区多年平均值提取到Excel表中。农业资源现状和农业生态环境数据通过数据采集和遥感数据进行解译,采用Python和Excel相结合处理成42个县级行政区的多年平均值。此外,对于区域缺失数据和时间缺失序列采用线性插值进行数据完善统一,并通过一致性检验。

1.4.2　熵权-TOPSIS方法的使用

(1) 数据标准化处理

通过对塔里木盆地16个评价指标的原始数据进行无量纲化来消除数据的量纲及数量级不一致对结果的影响。根据评价指标性质,采用离差标准化法对原始数据进行标准化处理。计算公式如下:

$$R_{ij}=\frac{x_{ij}-\min(x_j)}{\max(x_{ij})-\min(x_j)} \tag{5}$$

式中:x_{ij}为第i评价指标的第j年的原始数据(i=1,2,3,…,n; j=1,2,3,…,n);x_j为评价指标第j年原始数据;R_{ij}为经过标准化之后处于[0,1]之间的标准化值。

(2) 指标赋权

计算第i项评价指标权重W_{ij}:

$$f_{ij}=\frac{R_{ij}}{\sum_{j=1}^{n}R_{ij}} \tag{6}$$

$$E_i=-\ln(n)^{-1}\sum_{j=1}^{n}f_{ij}\times\ln f_j \tag{7}$$

$$W_{ij}=\frac{1-E_i}{\sum_{i=1}^{n}\left(1-E_i\right)} \tag{8}$$

式中：f_{ij} 表示第i个评价指标在第j个评价对象中的标准化值；E_i 为第i个评价指标的信息熵；f_j 表示第j个评价对象的指标值所占比重；W_{ij} 为第i项评价指标的权重。

（3）加权评价矩阵建立

Z由标准化后的数据矩阵P与W相乘后得到。计算公式如下：

$$Z = (Z_{ij})_{n \times m} = P_{ij} \times W_j \tag{9}$$

式中：Z_{ij} 为第i个评价指标在第j个评价对象上的加权结果；n为评价指标总数；m为评价对象总数；P_{ij} 为标准化后的第i个评价指标在第j年的数据值；W_j 为第j个评价指标的权重。

（4）正、负理想解确定

正理想解指各指标都达到样本中最好的值，负理想解指各指标都为样本中最差的值。

（5）指标与正、负理想解的距离计算

计算公式如下：

$$\begin{aligned} D_i^+ &= \sqrt{\sum_{j=1}^{m}\left(Z_{ij} - Z_j^+\right)^2}, (i = 1, \cdots, n) \\ D_i^- &= \sqrt{\sum_{j=1}^{m}\left(Z_{ij} - Z_j^-\right)^2}, (i = 1, \cdots, n) \end{aligned} \tag{10}$$

式中：D_i^+ 为+第i个样本与正理想解之间的距离；D_i^- 为第i个样本与负理想解之间的距离。

（6）相对欧式贴近度计算

计算公式如下：

$$C_i = \frac{D_i^-}{D_i^+ + D_i^-} \tag{11}$$

式中：贴近程度（C_i）的取值范围为[0,1]，越接近1表明样本评分越好。

2 结果与分析

2.1 塔里木盆地农业光热资源的年际变化

通过农业光热资源的6个评估指标进行计算，采用线性拟合分析整个塔里木盆地和不同县区近30 a来的年际变化趋势，其中整个区域使用的是不同年份所有县区的平均值。趋势分析结果（图2a~图2c与图2g~图2i）表明，1990—2020年塔里木盆地的年太阳辐射总量、≥10 ℃活动积温呈现出极显著的增加趋势，年均增加趋势分别为2.3318、10.146，年日照时数、年平均气温呈现出不显著的增加趋势，年均增加趋势为1.2435、0.0348，而≥3 h有效日照天数、年蒸发量则呈现出不显著的下降趋势，年均下降趋势为-0.1058、-0.5804。曼-肯德尔突变分析结果(图2d~图2f与图2j~图2l)表明，过去30 a的农业光热资源生产潜力可以划分为2个阶段[36]，具体结果如下：

年日照时数的第Ⅰ阶段为1990—1996年，*UF*值均小于等于0，呈下降趋势；第Ⅱ阶段为1997—2020年，其*UF*值从大于0转为小于0，再转为大于0的过程，表明年日照时数在这一阶段呈现不稳定变化趋势；年太阳辐射总量第Ⅰ阶段为1990—1996年，*UF*值先小于0，后转为大于0，说明该阶段的年太阳辐射总量生产潜力主要呈下降趋势，最后略有上升；第Ⅱ阶段为1997—2020年，其*UF*>0，且后半部分年份*UF*>1.96，表明年平均气温呈现增加趋势且后期增速加快；≥3 h有效日照天数生产潜力第Ⅰ阶段为1990—1996年，*UF*值均小于0，表明该阶段的年平均气温主要呈下降趋势；第Ⅱ阶段为1997—2020年，其大部分*UF*>0，表明≥3 h有效日照天数呈现不稳定的增加趋势；≥10 ℃活动积温第Ⅰ阶段为1990-1999年，*UF*值大部分小于0，说明≥10 ℃活动积温呈现不稳定的下降趋势；第Ⅱ阶段为2000—2020年，且*UF*大部分大于1.96，表明≥10 ℃活动积温呈现显著增加趋势；年平均气温第Ⅰ阶段为1990—1999年，*UF*值先小于0，后转为大于0，说明该阶段的年平均气温先呈下降趋势，最后略有上升；第Ⅱ阶段为1999—2020年，其*UF*>0，且后半部分年份*UF*>1.96，表明年平均气温呈现后期增速上升的增加趋势；年蒸发量第Ⅰ阶段为1990—1999年，*UF*值均小于等于0，且*UF*小于1.96，说明该阶段的年平均气温呈下降趋势；第Ⅱ阶段为1999—2020年，其*UF*先大于0，后小于0，表明年蒸发量先呈增加趋势后呈下降趋势。

总的来看，年日照时数、年太阳辐射总量的增加为该地区农作物光合作用提供更加充足的能量，年平均气温和≥10 ℃活动积温的适宜增高则满足农作物热量需求[37]，有助于延长农作物的生长周期，提高作物的成熟度和产量。而年蒸发量的降低有益于减少降水的蒸发，为农作物提供更好的水热条件。综合这些方面来看，近30 a来塔里木盆地的农业光热资源有所提升，在一定程度上提高了当地农产品的生长条件，能够促进当地的农业发展。

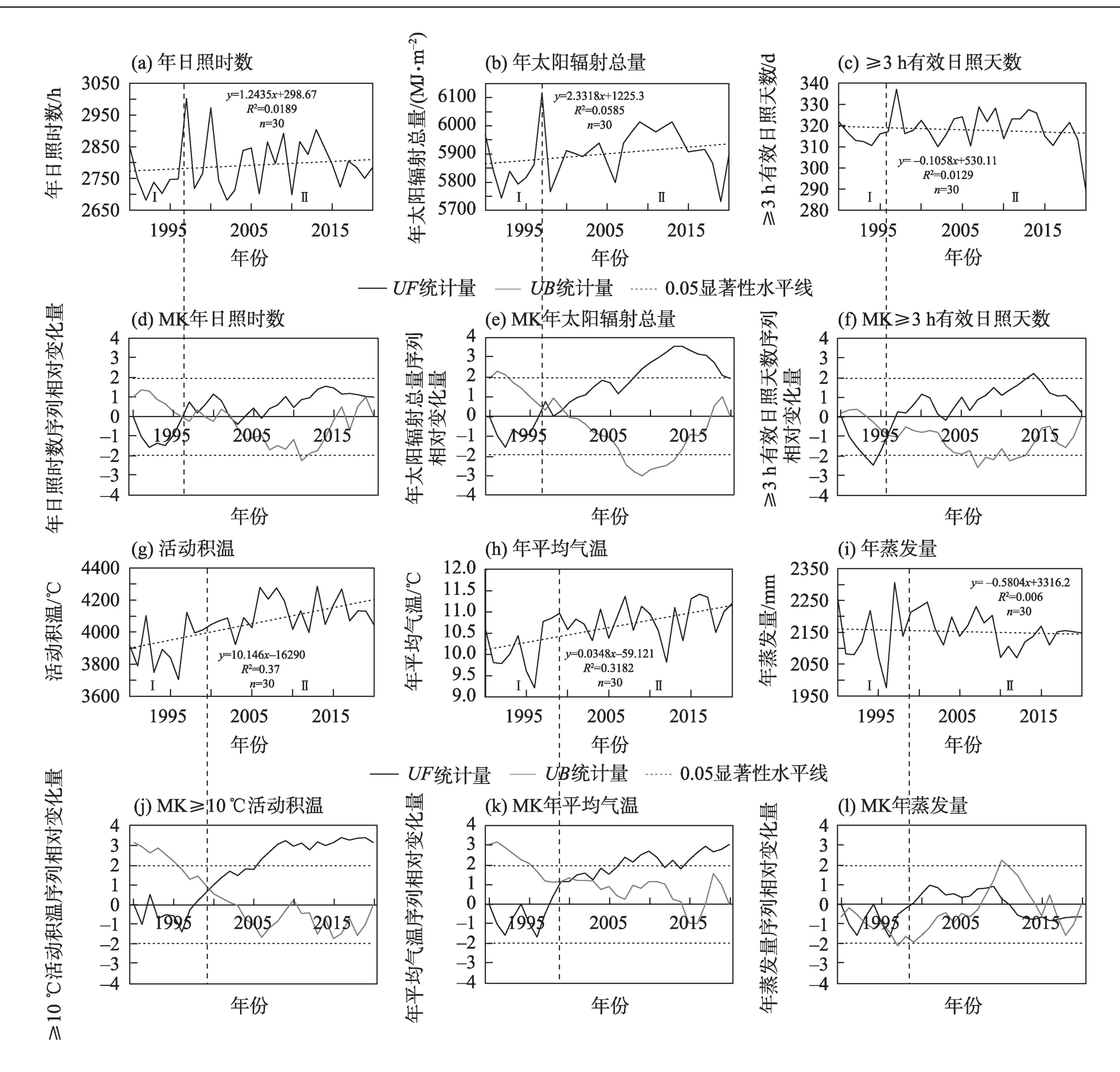


图2　1990—2020年塔里木盆地农业光热资源年际变化趋势

Fig. 2　Interannual variation trend of agricultural solar and thermal resources in Tarim Basin from 1990 to 2020

从不同区县来看(图3),塔里木盆地不同地区的农业光热资源年际变化趋势存在明显差异。其中,年日照时数和年太阳辐射总量的空间特征相似,这两个指标呈现增加趋势的县主要集中在中部、北部和南部,其中柯坪县、库尔勒市和焉耆回族自治县等地区的增加趋势最明显,呈现下降趋势的县则主要分布于东部和西部两侧。≥3 h有效日照天数和≥10 ℃活动积温的空间特征也相似,这两个指标呈现增加趋势的县主要集中在西南部,其中策勒县、于田县和洛浦县等地区的增加趋势最明显,呈现下降趋势的县则主要分布于东北部。此外,塔里木盆地所有县的年均气温都呈现上升趋势,上升趋势较为明显的县主要集中在西南部、西北部和南部,如阿图什市、伽师县、乌什县、民丰县和且末县等地区。年蒸发量呈现增加趋势的县在东部、西部和中部则都有分布,如西部的叶城县和塔什库尔干塔吉克自治县、中部的阿克苏市、东部的若羌县,年蒸发量呈现下降趋势的县则主要在西部地区,如麦盖提县、柯坪县和和田县等。

2.2　塔里木盆地农业光热资源的空间格局

通过计算近30 a农业光热资源的6个评估指标的平均值并统计到空间上,采用自然断点法对塔里木盆地不同县区进行分级,分析其空间分布特征(图4)。

总体来看,塔里木盆地农业光热资源存在非常显著的空间不均衡性,不同指标也都空间分异明

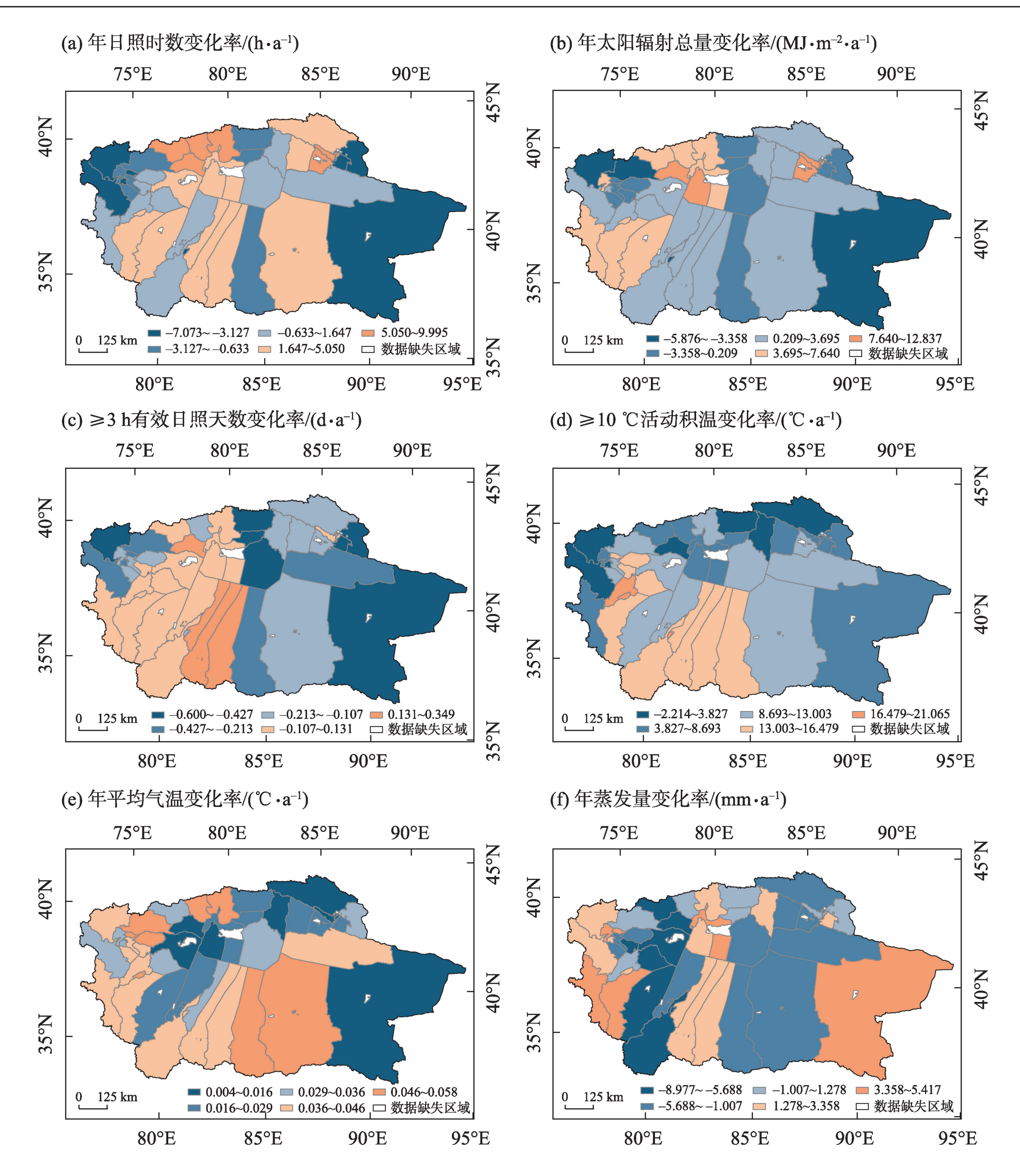


图3 塔里木盆地不同区县农业光热资源的年际变化倾向率

Fig. 3 Interannual variation tendency rate of agricultural light and heat resources in different districts and counties of Tarim Basin

显。塔里木盆地的年日照时数较长的县主要集中在东部和中部地区，包括若羌县、尉犁县、于田县等，较低的县主要分布在北部和西南部，包括和静县、轮台县、和田县等。具体来看，年太阳辐射总量大致呈现南高北低的空间格局，北部的和静县、轮台县较低，南部的于田县、民丰县、若羌县、叶城县和普泽县等较高，因南部地区纬度低而太阳辐射总量通常更高。≥3 h有效日照天数主要分布在东部、中部以及西部部分地区，如若羌县、于田县、民丰县、塔什库尔干塔吉克自治县等。≥10 ℃活动积温和年平均气温的空间分布特征相似，高值区主要集中在塔里木盆地的内部区域，这些地区海拔相对较低通常气温和≥10 ℃活动积温较高，如沙雅县、洛浦县、墨玉县等。塔里木盆地外围，尤其是偏北和偏西地区，海拔较高或纬度较高，故气温和≥10 ℃活动积温相对较低。年蒸发量较高的县主要分布在东部和南部[38]，如洛浦县、于田县、民丰县、策勒县、且末县等，偏北和偏西部地区因海拔和纬度较高而年蒸发量相对较低。

2.3 塔里木盆地农业光热资源的开发潜力

通过熵权-TOPSIS模型的计算，分别得到了塔里木盆地42个县的农业光热资源开发潜力，采用自

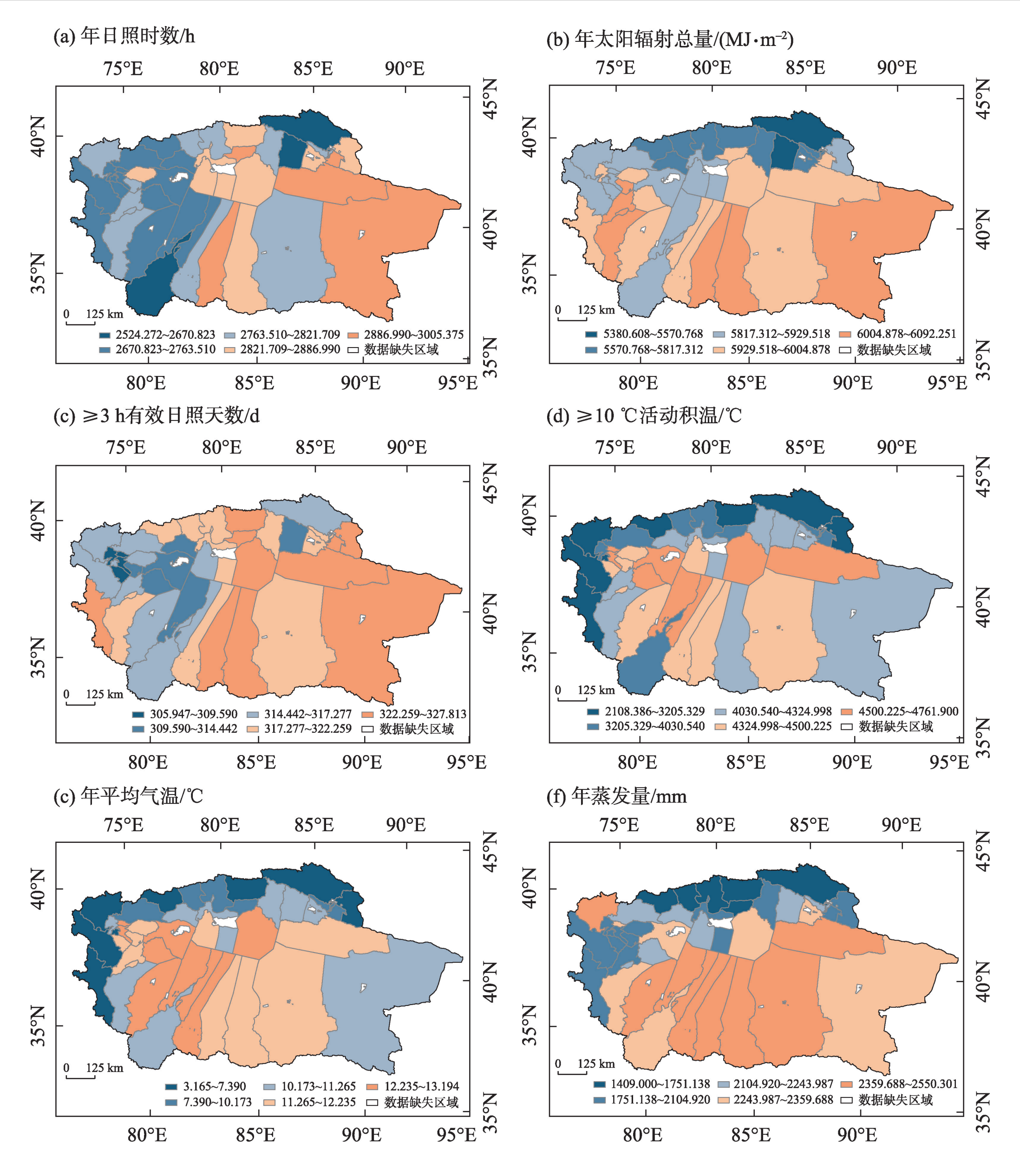


图4　塔里木盆地农业光热资源的空间分布

Fig. 4　Spatial distribution of agricultural light and heat resources in Tarim Basin

然断点法对其进行划分:低(0.093~0.130)、较低(0.131~0.172)、中等(0.173~0.221)、较高(0.222~0.329)、高(0.330~0.578)5个层次(图5)。从数量上来看,塔里木盆地农业光热资源开发潜力存在十分显著的差异性。42个县农业光热资源的开发潜力评分的平均值为0.1997,其中开发潜力评分最高的为策勒县(0.578),接近平均值的3倍。开发潜力值最低的为柯坪县(0.094),不到平均值的一半。潜力最高和潜力最低的县相差极大,前者评分是后者的6倍多。

从分布上来看,塔里木盆地农业光热资源开发潜力在空间上显现出极为明显的不均衡性。具有高开发潜力和较高开发潜力的县分布较为分散,基本形成了"多核心"的分布态势。具有高开发潜力的县包括策勒县和乌什县,分别位于塔里木盆地西北部和南部。策勒县近30 a的年平均气温显著高于其他地区,年日照时数、年太阳辐射总量、≥3 h有效日照天数以及≥10 ℃活动积温也相对较高,具有丰富的农业光热资源禀赋,同时也具有较好的农业资源条件和农业生态环境,因此,具有高开发潜力。乌什县≥3 h有效日照天数较多,其他光热条件相对适中,但年蒸发量相对低很多,其他农业资源条件

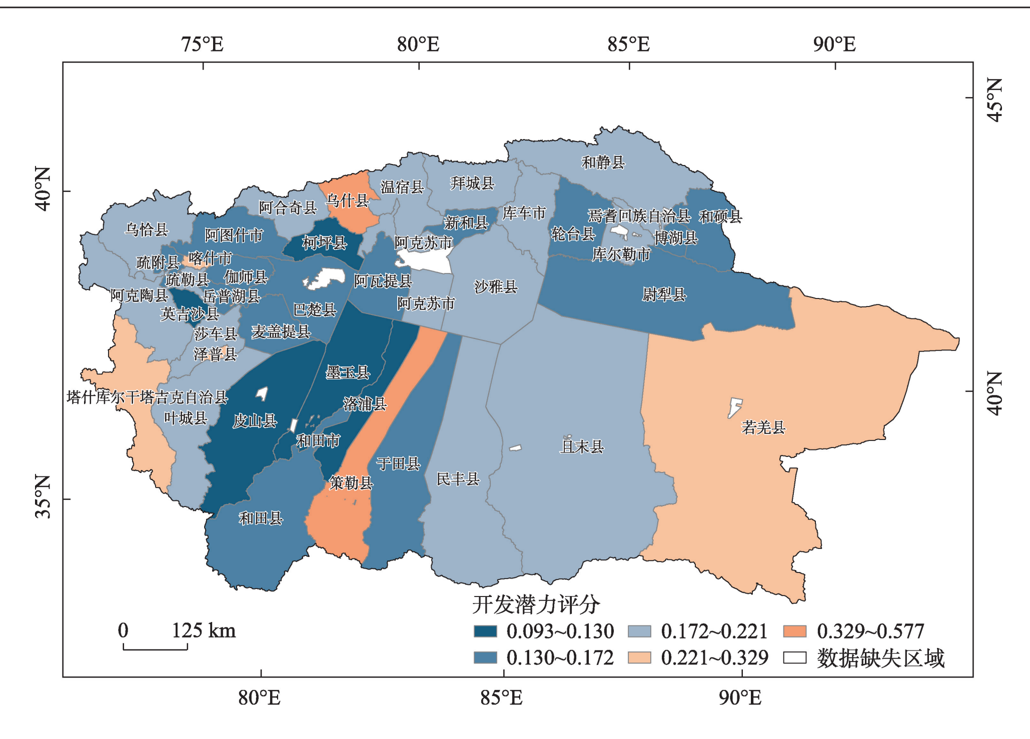


图5 塔里木盆地不同县区农业光热资源开发潜力的空间分布

Fig. 5 Spatial distribution of agricultural solar and thermal resources development potential in different counties of Tarim Basin

和农业生态环境相对较好,综合下来也具有高开发潜力。其次,较高开发潜力的县主要分布在塔里木盆地东部和西部,包括若羌县、泽普县、塔什库尔干塔吉克自治县等。农业光热资源开发潜力低、或较低的县则相对较为集中,主要分布在塔里木盆地的西部地区,低潜力地区主要有柯坪县、皮山县等。柯坪县年日照时数、年太阳辐射总量、≥3 h有效日照天数、≥10 ℃活动积温和年平均气温都相对不高,农业光热资源禀赋较弱,农业资源条件和农业生态环境较差,因此,开发潜力不高。皮山县年日照时数、≥3 h有效日照天数也相对较低,且年蒸发量非常高,农业资源条件和农业生态环境较差,光热资源的开发潜力也不高。

3 讨 论

本文基于熵权-TOPSIS模型的计算,分别得到了塔里木盆地16个要素的权重[39]。从权重数据来看,塔里木盆地农业基础设施投入(0.277)、有效灌溉面积(0.149)和水资源量(0.094),这3个因素对农业产值的驱动作用最为显著,明显高于光热资源年日照时数(0.012)、年太阳辐射总量(0.009)、≥10 ℃活动积温(0.015)、年平均气温(0.012)以及年蒸发量(0.091)本身的权重。

光热资源要素对农业产值的直接影响有限,权重较低,为农业生产提供了基本的自然条件[40]。它们主要通过调节作物的生长周期、提高作物产量和品质等方面间接影响农业产值,但是利用光热资源依赖于水资源和灌溉基础设施的支持,尤其是在塔里木盆地这样水资源有限的地区。因此,虽然光热资源富集,但缺乏水资源和基础设施会限制其对农业产出的贡献。此外,塔里木盆地光热资源的空间分异特征对于区域农业布局和发展策略的制定同样具有重要的指导意义,未来及当下可以通过合理的农业规划和管理,充分发挥农业光热资源的区域优势,推动当地农业和社会经济的高质量发展。

从权重来看,塔里木盆地丰富的光热资源为农业生产奠定了基本的自然条件基础,然而,在追求资源高效利用与提升农业产值的过程中[41],水资源量和灌溉面积成为了影响塔里木盆地农业产值的关键制约因素。只有水资源充足以及农业基础设施完善,光热资源的潜力才能转化为实际的农业产出[42-43]。并且随着光热资源的逐年增加,农业产值的潜力也随之提升,但这种提升受限于农业用水和基础设施的可利用性。因此,未来塔里木盆地应加大对水资源管理和基础设施建设的投入,充分利用自然光热资源,进一步提高资源的高效利用,以及

推动农业产值的增长。

4 结 论

通过对塔里木盆地42个县农业光热资源的时空格局进行研究,采用熵权-TOPSIS法和Mann-Kendall趋势检验等方法评估了塔里木盆地农业光热资源的开发潜力。主要得出以下结论:

(1) 近30 a来,塔里木盆地的农业光热资源展现出明显的变化趋势。年日照时数、年太阳辐射总量、≥10 ℃活动积温和年平均气温均呈现上升趋势,为农作物生长提供了更为优越的光热条件;≥3 h有效日照天数和年蒸发量则有所下降。

(2) 塔里木盆地农业光热资源在空间分布上呈现出显著的不均衡性。较高年日照时数和年太阳辐射总量的区域主要集中在东部和南部,而较低值则分布于北部和西南部。同时,≥10 ℃活动积温和年平均气温在区域间也存在明显差异,显示出由西南向东北逐渐降低的趋势。

(3) 塔里木盆地农业光热资源开发潜力存在显著差异,开发潜力评分均值为0.1997。其中开发潜力评分最高的为策勒县(0.578),开发潜力值最低的为柯坪县(0.094),潜力最高和潜力最低的县相差极大,前者评分是后者的6倍之多。

(4) 塔里木盆地农业光热资源开发潜力在空间上具有明显的不均衡性,具有高潜力和较高潜力的县分布较为分散,形成"多核心"的分布态势。具有高开发潜力的县包括策勒县和乌什县,低潜力地区主要有柯坪县、皮山县等。

参考文献(References):

[1] Dhonde M, Sahu K, Murty V V S, et al. The application of solar-driven technologies for the sustainable development of agriculture farming: A comprehensive review[J]. Reviews in Environmental Science and Bio/Technology, 2022, 21(1): 1-29.

[2] 周广学, 李普庆, 周晓东. 辽宁西部地区光热水资源变化对农业生产的影响[J]. 中国农业气象, 2011, 32(S1): 38-41. [Zhou Guangxue, Li Puqing, Zhou Xiaodong. Impact of light, heat and water resources change in Western Liaoning Province on agricultural production[J]. Chinese Journal of Agrometeorology, 2011, 32(S1): 38-41.]

[3] Hu Q, Pan F, Pan X, et al. Trends in agricultural heat and solar radiation resources in Northeast China: A multistage spatio-temporal analysis[J]. International Journal of Climatology, 2016, 36(6): 2461-2468.

[4] Pascaris A S, Chelsea S, Laurie B, et al. Integrating solar energy with agriculture: Industry perspectives on the market, community, and socio-political dimensions of agrivoltaics[J]. Energy Research & amp: Social Science, 2021, 75: 102023.

[5] Kumar C M S, Singh S, Kumar G M, et al. Solar energy: A promising renewable source for meeting energy demand in Indian agriculture applications[J]. Sustainable Energy Technologies and Assessments, 2023, 55: 102905.

[6] 刘守仁. 关于西部大开发对新疆工作的要求[J]. 中国工程科学, 2000, 2(10): 59-62. [Liu Shouren. Technology development of electric traction rail traffic[J]. Strategic Study of CAE, 2000, 2(10): 59-62.]

[7] 陈文烈, 郑苗. 推进新时代西部大开发形成新格局——基于"以大开放促进大开发"的视角解读[J]. 开发研究, 2024, 5(1): 1-12. [Chen Wenlie, Zheng Miao. Advancing the Great Western Development in the new era to form a new layout: An interpretation based on the perspective of "Promoting Great Development through Greater Opening-Up"[J]. Research on Development, 2024, 5(1): 1-12.]

[8] 刘彬, 杨改河, 张丽萍. 南疆地区农业资源生产潜力分析与评价——以阿拉尔垦区为例[J]. 干旱区资源与环境, 2006, 20(3): 139-143. [Liu Bin, Yang Gaihe, Zhang Liping. Analysis and evaluation on the production potential of agricultural resources in South Xinjiang area[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2006, 20(3): 139-143.]

[9] 郭海英. 陇东黄土高原光、热、水对冬小麦产量的贡献及水资源开发利用研究[J]. 干旱区资源与环境, 2004, 18(6): 128-131. [Guo Haiying. Contribute of sunlight temperature water to wheat output in winter and exploitation of water resource in Loess Plateau of Longdong[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2004, 18(6): 128-131.]

[10] Zhang S, Chen Z, Cao C, et al. Photothermal-management agricultural films toward industrial planting: Opportunities and challenges [J]. Engineering, 2024, 35: 191-200.

[11] 梁玉莲, 韩明臣, 白龙, 等. 中国近30年农业气候资源时空变化特征[J]. 干旱地区农业研究, 2015, 33(4): 259-267. [Liang Yulian, Han Mingchen, Bai Long, et al. Spatial-temporal distribution and variation characteristics of the agricultural climate resources over recent 30 years in China[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2015, 33(4): 259-267.]

[12] 雷蕾, 李剑萍, 马力文, 等. 宁夏中宁县枸杞精细化气候区划[J]. 经济林研究, 2020, 38(3): 104-111. [Lei Lei, Li Jianping, Ma Liwen, et al. A precise climate division of *Lycium barbarum* in Zhongning County, Ningxia[J]. Non-wood Forest Research, 2020, 38(3): 104-111.]

[13] 李树岩, 方文松, 马志红. 河南省夏玉米生长季农业气候资源变化分析[J]. 河南农业科学, 2012, 41(7): 21-26. [Li Shuyan, Fang Wensong, Ma Zhihong. Changes of agricultural climate resources

in Henan Province during summer maize growing season[J]. Journal of Henan Agricultural Sciences, 2012, 41(7): 21-26.]

[14] 杨鹏宇, 胡琦, 马雪晴, 等. 1961—2015年华北平原夏玉米生长季光热资源变化及其影响[J]. 中国农业气象, 2018, 39(7): 431-441. [Yang Pengyu, Hu Qi, Ma Xueqing, et al. Spatiotemporal variation of heat and solar resources and its impact on summer maize in the North China Plain over the period 1961-2015[J]. Chinese Journal of Agrometeorology, 2018, 39(7): 431-441.]

[15] 张玮, 严玲玲, 傅志强, 等. 播期对湖南省双季稻产量和光热资源利用效率的影响[J]. 中国农业科学, 2023, 56(1): 31-45. [Zhang Wei, Yan Lingling, Fu Zhiqiang, et al. Effects of sowing date on yield of double cropping rice and utilization efficiency of light and heat energy in Hunan Province[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2023, 56(1): 31-45.]

[16] 米娜, 张富荣, 赵一俊, 等. 玉米间隔耕作秸秆条带还田增密集成技术光热资源利用效率评估[J]. 农业资源与环境学报, 2021, 38(3): 475-483. [Mi Na, Zhang Furong, Zhao Yijun, et al. Evaluating the radiation and thermal use efficiency of the integrated technology of maize straw returning with alternate tillage and density increase[J]. Journal of Agricultural Resources and Environment, 2021, 38(3): 475-483.]

[17] 姜丽娜, 李金娜, 齐红志, 等. 不同栽培模式冬小麦物质积累转运及光热资源利用研究[J]. 河南农业科学, 2018, 47(12): 14-19. [Jiang Lina, Li Jinna, Qi Hongzhi, et al. Matter accumulation and transport of winter wheat and utilization of photothermal resources under different cultivation patterns[J]. Journal of Henan Agricultural Sciences, 2018, 47(12): 14-19.]

[18] 叶彩华, 栾庆祖, 胡宝昆, 等. 北京农业气候资源变化特征及其对不同种植模式玉米各生育期的影响[J]. 自然资源学报, 2010, 25(8): 1350-1364. [Ye Caihua, Luan Qingzu, Hu Baokun, et al. Agricultural climate resources change characteristics of Beijing and related impacts on maize planted in different zones and different growth periods[J]. Journal of Natural Resources, 2010, 25(8): 1350-1364.]

[19] 蔡福, 张玉书, 陈鹏狮, 等. 近50年辽宁热量资源时空演变特征分析[J]. 自然资源学报, 2009, 24(9): 1635-1646. [Cai Fu, Zhang Yushu, Chen Pengshi, et al. Spatio-temporal characteristics of Liaoning themal resources in recent 50 years[J]. Journal of Natural Resources, 2009, 24(9): 1635-1646.]

[20] 李涛辉, 张文翔, 吕爱锋, 等. 云南省农业生长季热量资源的时空特征[J]. 山地学报, 2023, 41(3): 361-374. [Li Taohui, Zhang Wenxiang, Lv Aifeng, et al. Temporal and spatial characteristics of heat resources in growing season in Yunnan Province, China[J]. Mountain Research, 2023, 41(3): 361-374.]

[21] 刘晓迎, 陈罗成, 赵巧梅, 等. 豫北主要农作物光热资源利用效率研究[J]. 河南农业科学, 2012, 41(4): 29-33. [Liu Xiaoying, Chen Luocheng, Zhao Qiaomei, et al. Light and heat utilization efficiency of winter wheat and summer maize in northern region of Henan Province[J]. Journal of Henan Agricultural Sciences, 2012, 41(4): 29-33.]

[22] 张志高, 张秀丽, 贾梦薇, 等. 1960—2020年黄河流域农业热量资源时空演变特征[J]. 山西农业大学学报(自然科学版), 2024, 44(3): 119-130. [Zhang Zhigao, Zhang Xiuli, Jia Mengwei, et al. Spatiotemporal evolution characteristics of agricultural thermal resources in the Yellow River Basin from 1960 to 2020[J]. Journal of Shanxi Agricultural University(Natural Science Edition), 2024, 44(3): 119-130.]

[23] 刘淳, 任立清, 李学军, 等. 1990—2019年中国北方沙区太阳能资源评估[J]. 高原气象, 2021, 40(5): 1213-1223. [Liu Chun, Ren Liqing, Li Xuejun, et al. Evaluation to the solar energy resources in the sandy regions of Northern China from 1990 to 2019[J]. Plateau Meteorology, 2021, 40(5): 1213-1223.]

[24] 王畅, 赵海东, 冯乃杰, 等. 两个生态区大豆光热资源利用率和产量的差异及对化控剂的响应[J]. 应用生态学报, 2018, 29(11): 3615-3624. [Wang Chang, Zhao Haidong, Feng Naijie, et al. Differences in light and heat utilization efficiency and yield of soybean in two ecological zones and their response to chemical control regulators[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2018, 29(11): 3615-3624.]

[25] 岳伟, 陈金华, 阮新民, 等. 安徽省沿江地区双季稻光热资源利用效率变化特征及对气象产量的影响[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2019, 27(6): 929-940. [Yue Wei, Chen Jinhua, Ruan Xinmin, et al. Variation in characteristics of light and heat resource utilization efficiency of double-season rice and its impact on meteorological yield along the Yangtze River in Anhui Province[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2019, 27(6): 929-940.]

[26] 满苏尔·沙比提, 努尔卡木里·玉素甫. 塔里木河流域绿洲耕地变化及其河流水文效应[J]. 地理研究, 2010, 29(12): 2251-2260. [Mansur Shabiti, Nurkamuri Yusuf. Oasis land use change and its hydrological response to Tarim River Basin[J]. Geographical Research, 2010, 29(12): 2251-2260.]

[27] He G, Kammen M D. Where, when and how much wind is available? A provincial-scale wind resource assessment for China[J]. Energy Policy, 2014, 7(4): 116-122.

[28] 余国安, 李志威, 黄河清, 等. 人类活动影响下的干旱区河流地貌演变——以塔里木河为例[J]. 水科学进展, 2017, 28(2): 183-192. [Yu Guo'an, Li Zhiwei, Huang Heqing, et al. Human impacts on fluvial processes in a very arid environment: Case of Tarim River in China[J]. Advances in Water Science, 2017, 28(2): 183-192.]

[29] Li Z, Luo Z, Wang Y, et al. Suitability evaluation system for the shallow geothermal energy implementation in region by entropy weight method and TOPSIS method[J]. Renewable Energy, 2022, 18(4): 564-576.

[30] 唐承财, 刘亚茹, 万紫微, 等. 传统村落文旅融合发展水平评价及影响路径[J]. 地理学报, 2023, 78(4): 980-996. [Tang Chengcai, Liu Yaru, Wan Ziwei, et al. Evaluation system and influencing paths of the integration of culture and tourism of traditional villag-

es[J]. Acta Geographica Sinica, 2023, 78(4): 980-996.]

[31] 解智涵, 刘敏, 闫旭纲, 等. 黄河流域重要地质遗迹空间格局及地质旅游开发潜力评价[J]. 中国沙漠, 2024, 44(3): 128-139. [Xie Zhihan, Liu Min, Yan Xugang, et al. Spatial pattern of important geological remains and evaluation of geotourism development potential in the Yellow River Basin[J]. Journal of Desert Research, 2024, 44(3): 128-139.]

[32] 戴文渊, 玛久草, 陈亦晨, 等. 黄河流域甘肃段水生态安全驱动力分析及动态演变[J]. 干旱区研究, 2024, 41(10): 1662-1671. [Dai Wenyuan, Ma Jiucao, Chen Yichen, et al. Analysis of driving forces and dynamic evolution of water ecological security in the Gansu section of the Yellow River Basin[J]. Arid Zone Research, 2024, 41(10): 1662-1671.]

[33] 梁玉莲, 申彦波, 白龙, 等. 华南地区太阳能资源评估与开发潜力[J]. 应用气象学报, 2017, 28(4): 481-492. [Liang Yulian, Shen Yanbo, Bai Long, et al. Assessment of solar energy resource and its exploitation potential in South China[J]. Journal of Applied Meteorological Science, 2017, 28(4): 481-492.]

[34] 刘明, 吕爱锋, 武建军, 等. 干旱对农业生态系统影响研究进展[J]. 中国农学通报, 2014, 30(32): 165-171. [Liu Ming, Lv Aifeng, Wu Jianjun, et al. A Review of impacts of drought on agroecosystem[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2014, 30(32): 165-171.]

[35] Wang Y, Yang J, Chen Y, et al. Monitoring and predicting drought based on multiple indicators in an arid area, China[J]. Remote Sensing, 2020, 12(14): 2298.

[36] 李涛辉, 尹鹏飞, 吕爱锋, 等. 中国东部季风区植被气候生产潜力的时空特征[J]. 东北林业大学学报, 2023, 51(10): 62-69, 91. [Li Taohui, Yin Pengfei, Lv Aifeng, et al. Spatio-temporal characteristics of climate production potential of vegetation in Eastern Monsoon Region of China[J]. Journal of Northeast Forestry University, 2023, 51(10): 62-69, 91.]

[37] 申彦波, 王传辉, 陈运. 中国东北三省地面太阳辐射变化及其对气温变化的影响[J]. 地理科学, 2023, 43(11): 2045-2052. [Shen Yanbo, Wang Chuanhui, Chen Yun. Variation of surface solar radiation and its influence on temperature change in three provinces of Northeast China[J]. Scientia Geographica Sinica, 2023, 43(11): 2045-2052.]

[38] 邓兴耀, 刘洋, 刘志辉, 等. 中国西北干旱区蒸散发时空动态特征[J]. 生态学报, 2017, 37(9): 2994-3008. [Deng Xingyao, Liu Yang, Liu Zhihui, et al. Temporal-spatial dynamic change characteristics of evapotranspiration in arid region of Northwest China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2017, 37(9): 2994-3008.]

[39] Zheng Y, He J, Zhang W, et al. Assessing water security and coupling coordination in the Lancang-Mekong River Basin for sustainable development[J]. Sustainability, 2023, 15(24): 131-133.

[40] Li T, Lv A, Zhang W, et al. Spatiotemporal characteristics of watershed warming and wetting: The response to atmospheric circulation in arid areas of Northwest China[J]. Atmosphere, 2023, 14(1): 151.

[41] Williams K B, Martin M D. Dynamic use of agriculture incentives to promote conservation[J]. Journal of Environmental Management, 2024, 370(1): 25.

[42] 张音, 孙从建, 刘庚, 等. 近20 a塔里木河流域山区NDSI对气候变化的响应[J]. 干旱区研究, 2024, 41(10): 1639-1648. [Zhang Yin, Sun Congjian, Liu Geng, et al. Response of NDSI in the Tarim River Basin mountainous areas to climate change over the past 20 years[J]. Arid Zone Research, 2024, 41(10): 1639-1648.]

[43] 许赟红, 刘琼, 陈勇航, 等. 新疆及周边中亚地区土地覆盖变化对地表反照率的影响[J]. 干旱区研究, 2024, 41(10): 1649-1661. [Xu Yunhong, Liu Qiong, Chen Yonghang, et al. Impact of land cover variations on surface albedo in Xinjiang and its surrounding Central Asian region[J]. Arid Zone Research, 2024, 41(10): 1649-1661.]

Characteristics and development potential analysis of agricultural solar-thermal resources in the Tarim Basin

WEN Di[1], LYU Aifeng[2], LI Taohui[3], ZHANG Wenxiang[1]

(1. Key Laboratory of Plateau Geographic Processes and Environment Change of Yunnan Province, Faculty of Geography, Yunnan Normal University, Kunming 650500, Yunnan, China; 2. Key Laboratory of Water Cycle and Related Land Surface Processes, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China; 3. Key Laboratory of Meteorological Disasters and Climate Resources in the Greater Mekong Subregion, Yunnan University, Kunming 650091, Yunnan, China)

Abstract: Agricultural solar thermal resources are the core advantage in the national strategy of the Tarim Basin's western development. However, there has been no comprehensive quantitative assessment of the potential for developing agricultural solar thermal resources in the Tarim Basin. Based on the analysis of the inter-annual trend and spatial pattern characteristics of agricultural solar thermal resources in 42 counties in the Tarim Basin, this study established a comprehensive evaluation index system and used the entropy-weight TOPSIS method and Mann-Kendall trend test to evaluate the potential for developing agricultural solar thermal resources in the Tarim Basin. The results revealed that (1) between 1990 and 2020, the agricultural solar thermal resources in the Tarim Basin, including annual sunshine hours, annual solar radiation, annual active heat accumulation above 10 ℃, and annual mean temperature, exhibited an upward trend, while the number of days with at least three hours of effective sunshine and annual evaporation displayed a downward trend. (2) a significant spatial imbalance was observed in the agricultural solar thermal resources in the Tarim Basin, and different indicators displayed different spatial differentiation patterns, forming obvious spatial features of high and low agricultural solar thermal resources aggregation distribution. (3) a significant spatial difference was observed in the potential for developing agricultural solar thermal resources in the Tarim Basin, with an average score of 0.199. The highest score of 0.578 was observed in Zhalay County, which was more than six times higher than in Keping County, with 0.094. These results reveal a "multicore" distribution pattern. The findings can provide a realistic reference for the development and utilization of agricultural solar thermal resources in the Tarim Basin and help improve the local resource utilization efficiency.

Keywords: Tarim Basin; agricultural solar-thermal resources; spatiotemporal pattern; developing potential; entropy-weight TOPSIS method